

电磁兼容及防护技术系列专著

# 雷电电磁脉冲 及其防护

LEIDIAN DIANJI MAICHONG  
JIQI FANGHU

魏明 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 雷电电磁脉冲及其防护

魏 明 主编

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

雷电电磁脉冲是雷电过程产生的瞬变电流和电磁辐射,是信息化时代的防雷薄弱环节。本书系统介绍了雷电电磁脉冲危害及其防护技术,全书共9章。第1章、第2章讲述防雷技术的发展过程和雷电形成的物理机制;第3章介绍引雷空间概念及雷击概率;第4章、第5章讲述基于镜像法的直击雷电电磁脉冲场计算方法和实验室模拟技术;第6章讲述直击雷防护技术;第7章、第8章讲述雷电电磁脉冲防护方法;第9章介绍雷电损害风险评估技术。

本书适合从事雷电防护工程和理论研究的科技人员阅读,也可作为高校相关专业高年级学生和研究生教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

雷电电磁脉冲及其防护/魏明编著. —北京:国防工业出版社, 2012. 1  
ISBN 978-7-118-06959-4

I. ①雷… II. ①魏… III. ①雷—电磁脉冲②闪电—电磁脉冲③防雷 IV. ①P427.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第113679号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

军械工程学院印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 14 字数 343 千字

2012年1月第1版第1次印刷 印数 1-3000册 定价 32.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010) 68428422

发行邮购:(010) 68414474

发行传真:(010) 68411535

发行业务:(010) 68472764

# 前 言

雷电电磁脉冲是伴随雷电放电产生的电流瞬变和强电磁场辐射，属于雷电的二次效应，出现的频率非常高，是最常见的天然强电磁脉冲干扰源之一。据统计，全球范围内每秒约发生 100 次闪电，闪电通道电流高达几十万安乃至上百万安，电流上升率可达几万安/微秒，在闪电通道周围产生强大的电磁感应效应、热效应、电动力效应、高电压波侵入和电磁辐射效应等。

人类对雷电防护的科学研究已经有 200 多年的历史，避雷装置由单一的富兰克林避雷针发展到避雷网、避雷带等多种形式，对直击雷的防护已经日臻完善，大大降低了直击雷灾害的概率。但是对雷电灾害的认识和预防，主要是以防护直击雷为主，而对雷电电磁脉冲的认识和研究起步比较晚，直到 20 世纪 70 年代，雷电的电磁脉冲效应才逐渐引起了防雷研究人员的广泛重视。

雷电电磁脉冲危害随着微电子技术的发展而日益突出，由于雷电电磁脉冲的危害区域远大于直击雷，它既可以由云地闪电产生，也可以由云内闪电和云际闪电产生，影响范围遍布对流层以下至地表以上区域，对空中飞行的火箭、飞机、导弹，地面架空输电线、各种电子装备和深埋地下的电缆乃至油气输送管道，都有不同程度的危害。在直击雷防护技术相对成熟的今天，雷电电磁脉冲所造成的损失仍呈逐年上升之势，特别是对电力、通信和航空航天等部门，危害尤为严重。因此，雷电电磁脉冲的防护是信息化时代防雷技术领域中的薄弱环节。

本书从防雷技术发展历史和雷电电磁脉冲危害形成机制入手，系统阐述了雷电电磁脉冲的表现形式、危害机理，同时注意吸收国内外雷电电磁脉冲研究的最新成果，重点讲述了雷电电磁脉冲场的计算方法和实验室模拟技术。并结合防雷工程实际，介绍了电磁兼容性测试中雷电电磁脉冲敏感度的测试与仿真方法。

全书共分 9 章。第 1 章、第 2 章讲述防雷技术的发展过程和雷电形成的物理机制；第 3 章介绍引雷空间概念及雷击概率；第 4 章、第 5 章论述基于镜像法的直击雷电磁脉冲场计算方法和实验室模拟技术；第 6 章简要讲述直击雷防护技术；第 7 章、第 8 章讲述雷电电磁脉冲防护方法；第 9 章介绍雷电损害风险评估技术。

本书是作者在研究生课程讲义基础上增补完成的，全书由魏明主编。其中，第 3 章由王向东编写，4.2 节~4.6 节由田明宏编写，6.8 节由陈翔编写，第 9 章由王雷编写，周星、杨楠参加了第 5 章、第 7 章的编写工作，其余章节由魏明编写。由于时间紧迫和学识有限，书中难免出现不妥之处，敬请读者指正。

本书出版得到国家自然科学基金资助项目（50877079）和国防科技重点实验室基金项目（9140C87020509JB34）的资助，谨致谢意。

编 者  
2010 年 10 月

# 目 录

第1章 概 论 .....	1
1.1 雷电的危害 .....	1
1.2 中国古代对雷电现象的认识 .....	2
1.3 近代雷电科学发展历程 .....	4
1.4 我国雷电发生频率分布 .....	8
思考题 .....	10
第2章 雷电的物理过程 .....	11
2.1 雷雨云的起电机理 .....	12
2.1.1 温差起电机理 .....	12
2.1.2 感应起电机理 .....	13
2.1.3 水滴破裂起电机理 .....	13
2.2 雷雨云放电过程 .....	14
2.3 雷电危害方式 .....	17
2.3.1 热效应 .....	17
2.3.2 冲击波效应 .....	18
2.3.3 电动力效应 .....	18
2.3.4 电磁效应 .....	18
2.3.5 地电位反击 .....	20
2.3.6 跨步电压作用 .....	21
2.3.7 过电压波侵入 .....	21
2.4 雷电流的特征参数与数学模型 .....	22
思考题 .....	26
第3章 引雷空间与雷击概率 .....	27
3.1 国家标准中的建筑物年雷击率计算方法 .....	28
3.2 引雷空间 .....	29
3.3 基于引雷空间的建筑物年雷击率 .....	30
思考题 .....	32
第4章 雷电电磁脉冲场 .....	33
4.1 雷电电磁脉冲分类 .....	33
4.1.1 静电脉冲 .....	33
4.1.2 地电流瞬变 .....	34
4.1.3 电磁场辐射 .....	34
4.2 雷电脉冲场理论基础 .....	36

4.3	雷电回击工程模型	43
4.3.1	BG 模型	43
4.3.2	TCS 模型	44
4.3.3	TL 模型	44
4.3.4	MTL 模型(MTLL 模型和 MTLE 模型)	44
4.3.5	MULS 模型	45
4.3.6	DU 模型	45
4.4	雷电回击工程模型比较	46
4.4.1	通道中回击电流的时空分布	46
4.4.2	回击工程模型比较	49
4.4.3	对 DU 模型的改进	51
4.5	雷电回击电磁脉冲场时空分布规律	53
4.5.1	雷电流的脉冲函数表达式	53
4.5.2	IEC 标准雷电回击电流及其拆分	55
4.5.3	地面附近回击电磁脉冲场的计算	57
4.6	有限电导率地面对回击电磁场的影响	62
4.6.1	有限电导率地面回击电磁场的解析解	62
4.6.2	有限电导率地面垂直电场和水平磁场的近似求解	63
4.6.3	有限电导率地面水平电场的近似求解	64
4.6.4	大地表面阻抗法和斜波法远区场等价性解析证明	65
	思考题	66
<b>第 5 章</b>	<b>雷电电磁脉冲模拟与效应实验</b>	<b>67</b>
5.1	雷击浪涌模拟	67
5.1.1	浪涌发生器工作原理	68
5.1.2	测试方法	69
5.2	雷电电磁脉冲远场模拟	72
5.2.1	Marx 发生器	72
5.2.2	有界波模拟器	74
5.3	雷电电磁脉冲磁场模拟和测量	76
5.3.1	脉冲磁场环境的模拟	76
5.3.2	脉冲磁场环境的测量	77
5.4	雷电电磁脉冲效应实验	83
5.4.1	LEMP 磁场辐照效应实验	83
5.4.2	雷击浪涌对开关电源的注入效应实验	88
5.5	雷电电磁脉冲效应仿真	92
5.5.1	常用的 LEMP 仿真方法	92
5.5.2	基于系统辨识的 LEMP 效应仿真实例	94
5.5.3	LEMP 效应仿真发展趋势	99
	思考题	101

<b>第6章 直击雷防护技术</b>	102
6.1 防雷建筑物的分类	102
6.2 避雷针	103
6.3 避雷线、避雷带与避雷网	105
6.4 接闪器的保护范围	107
6.5 引下线	110
6.6 接地技术	111
6.6.1 接地电阻	112
6.6.2 防雷接地装置的施工	116
6.6.3 接地方式	120
6.6.4 供电系统的接地与接零方式	122
6.7 非常规避雷装置	125
6.7.1 激光引雷	126
6.7.2 火箭引雷	126
6.7.3 水柱引雷	126
6.7.4 放射性避雷针	126
6.7.5 排雷器	126
6.7.6 消雷器	127
6.7.7 优化避雷针	127
6.7.8 早期预放电避雷针	128
6.8 雷电定位与预警	129
6.8.1 雷电定位技术的发展	129
6.8.2 雷电定位技术分类	129
思考题	133
<b>第7章 雷电电磁脉冲能量耦合与浪涌保护器</b>	135
7.1 雷电电磁脉冲能量耦合分析	135
7.1.1 传导耦合	135
7.1.2 辐射耦合	137
7.2 浪涌保护器件	140
7.3 浪涌保护器的参数检测	148
7.4 浪涌保护器的使用	150
思考题	152
<b>第8章 电子信息系统的雷电防护</b>	153
8.1 电子信息系统的雷电防护分级	154
8.1.1 按雷击风险评估确定雷电防护等级	154
8.1.2 按建筑物电子信息系统的重要性确定雷电防护等级	155
8.2 分区防护	156
8.3 综合防雷技术	157
8.3.1 等电位连接	157

8.3.2	传导 .....	161
8.3.3	分流 .....	161
8.3.4	接地 .....	165
8.3.5	屏蔽 .....	165
8.3.6	躲避 .....	167
	思考题 .....	167
<b>第9章</b>	<b>雷电损害风险评估 .....</b>	<b>168</b>
9.1	评估方法 .....	168
9.2	年雷击次数估算 .....	171
9.2.1	雷击建筑物的年度平均次数的评估( $N_D$ ) .....	172
9.2.2	雷击建筑物邻近区域的年度平均次数的评估( $N_M$ ) .....	173
9.2.3	雷击线路(公共设施)的年度平均次数的评估( $N_L$ ) .....	173
9.2.4	雷击线路(公共设施)邻近区域的年度平均次数的评估( $N_I$ ) .....	175
9.3	损害概率 .....	175
9.3.1	雷击建筑物的损害概率 .....	175
9.3.2	雷击建筑物邻近区域导致电气和电子系统失效的损害概率 $P_M$ .....	177
9.3.3	雷击入户线路的损害概率 .....	178
9.3.4	雷击入户线路邻近区域导致电气和电子系统失效的损害概率 $P_Z$ .....	179
9.3.5	雷击公共设施损害概率 .....	179
9.4	损失量的评估 .....	181
9.4.1	致人伤亡的损失量 .....	182
9.4.2	公共设施的损失 .....	184
9.4.3	文化遗产损失 .....	185
9.4.4	经济损失 .....	185
9.4.5	雷击公共设施损失的评估 .....	186
9.5	风险组成 .....	187
9.5.1	雷击建筑物的风险组成 .....	187
9.5.2	影响建筑物分风险的因素 .....	189
9.5.3	公共设施的风险组成 .....	190
9.5.4	影响公共设施分风险的因素 .....	190
9.6	风险评估 .....	191
9.6.1	雷击建筑物分风险的评估 .....	191
9.6.2	雷击公共设施风险评估 .....	192
9.7	风险管理 .....	193
9.7.1	可承受风险 $R_T$ .....	194
9.7.2	评估防护需求的程序 .....	194
9.7.3	损失成本评估 .....	194
9.7.4	评估防护措施经济性的程序 .....	195
9.8	雷电损害风险评估实例分析 .....	196



9.8.1 建筑物雷电损害风险评估 .....	196
9.8.2 公共设施雷电损害风险评估 .....	201
思考题.....	202
附录 A 防雷减灾管理办法.....	203
附录 B 部分防雷相关标准、规范.....	207
参考文献.....	210

# 第 1 章 概 论

雷电(Lightning)是一种常见的大气放电现象,它与人类的生活息息相关,是自然界不可或缺或物理过程。生物学家通过模拟地球原始大气成分的放电实验,把无机物合成了 11 种氨基酸,而这些物质是构成蛋白质的基础,因此,生命起源学说认为是雷电孕育了地球上的原始生命;雷电引起森林大火并烧死野生动物,才促使原始人类从茹毛饮血走向熟食之路。另外,雷电是维持大气电平衡的重要因素,大气电离层是总体上带正电荷,它起着阻挡太阳紫外线和宇宙射线的保护作用,电离层与带负电荷的地球之间存在大气电场,大气电场强度随高度减小,在地表附近,电场强度达到最大值。陆地上约为  $120\text{V/m}$ ,海洋上约为  $130\text{V/m}$ ,而在受到严重污染的局部地区电场强度可达  $360\text{V/m}$  以上。在地壳放射性元素和宇宙射线的电离作用下,空气中存在一定浓度的离子,在电场力作用下定向流动形成大气运流电流。据估算,在晴朗天气下,电离层流向地球的总电流约为  $1000\text{A}$ ,如果没有雷电活动,电离层电荷将很快消散。正是云地闪电不断把正电荷从大地送回到电离层,才使电离层与大地之间的大气电场保持相对稳定。

应当看到,除了上述正面作用,雷电以其强大的电流、高电压及瞬态电磁辐射对建筑物、人畜、各种电子设备等造成了严重危害,从古至今,人类不断对这种自然放电现象进行研究,寻求各种防御雷电灾害的技术。

本书从人类对雷电认识过程的开始,系统阐述了雷电的表现形式、物理过程及危害方式,分析了直击雷防护原理、雷电电磁脉冲场理论模型、实验室模拟方法相关实验技术,并结合相关标准阐述电子信息系统的雷电综合防护技术,最后介绍了雷电损害风险评估方法。

## 1.1 雷电的危害

雷电是一种典型的天然强电磁脉冲源,据统计,全球范围内每秒约发生 100 次闪电过程。雷电放电通道的峰值电压可高达数百万伏,电流达几十万安,电流上升率达几万安/微秒。因此,在放电通道周围会产生强大的电磁感应效应、热效应、电动力效应、高电压波入侵和电磁辐射效应,对附近的建筑物、人员和电子设备构成严重威胁。据统计,全球森林火灾约有  $1/2$  是由雷击引起的;美国每年因雷击造成的死伤人数,大致与龙卷风危害相当;我国平均每年因雷击造成的经济损失也超过百亿元。

雷电对武器、弹药造成的灾害在国内外时有发生。早在 18 世纪,欧洲就发生过几起教堂遭雷击致使储存在教堂内的炸药发生爆炸的事故。1961 年秋,意大利发生了因雷击使“丘比特”导弹系统多次遭到严重破坏的事件;1967 年,由于雷电作用,美国的山迪亚实验室发生了弹药爆炸事故;1977 年 7 月,苏联某弹药库受雷击,弹药爆炸持续数小时之久,死亡 340 人;1984 年 5 月,我国云南薄竹箐地区的一个火箭炮阵地上,由于雷电作用,致使三枚火箭弹自行飞出阵地;1987 年,肯尼迪航天中心的火箭发射场上有 3 枚小型火箭在

一声雷响之后，自行点火升空。因此，雷电危害越来越引起人们的重视，也促进了世界各国对雷电防护研究的进一步深化。

随着避雷针的发明和推广，此类事故已大大减少。但是，在直击雷防护技术相对成熟的今天，伴随雷电放电产生的电磁脉冲(Lightning Electro - Magnetic Pulse, LEMP)所造成的损失正呈逐年上升之势，特别是电力、通信、航空航天等领域，危害尤为严重。

随着芯片集成度的不断提高，其电磁敏感度也逐渐提高，美国 AD 报告(AD - 722675)指出：当 LEMP 磁场达到 0.07Gs 时，即可导致运行中的无屏蔽的计算机发生误动作等类型的软损伤；当 LEMP 磁场达到 2.4Gs 时，可以造成计算机的硬损伤。我国也有类似报道，如国家气象中心大楼曾遭雷击，楼内的计算机网络通信中断，气象业务受到严重影响，该大楼的避雷系统符合设计规范，但强大的雷电流在避雷针周围产生了电磁脉冲场并通过各种能量耦合通道进入电子设备内部，使计算机通信部件遭到感应过电压的破坏。类似的事例不胜枚举，造成的损失触目惊心。据统计，由于 LEMP 导致计算机网络失效或损坏约占全部计算机故障的 70%；我国近几年因 LEMP 造成的损失也逐年增加，因雷电侵害信息系统而造成的直接损失约占雷电总损失的 80%。

在军事领域，LEMP 危害更不能忽视。伴随武器装备信息化、自动化程度的提高，雷电作为构成战场复杂电磁环境的重要因素，导致武器装备受到干扰、损伤的事故层出不穷。任何军事行动都处在一定的电磁环境中。现代化武器装备的效能发挥，强烈地依赖于战场的电磁环境。在现代战场上，武器装备的生存力及战斗力都与其防电磁危害的能力紧密相联。因此，世界各国都十分重视武器装备的抗 LEMP 干扰能力。美国 AD 报告(AD - A243367)指出，在现代战场和后勤保障中应考虑电磁环境效应有 14 种，包括静电放电、电磁兼容性、电磁敏感性、电磁辐射危害、雷电效应、电子对抗、干扰/阻断、电磁干扰、电磁易损性、电磁脉冲、射频能的威胁、电子战、高能微波和元件间的干扰。

## 1.2 中国古代对雷电现象的认识

早在公元前 1500 年左右的殷商甲骨文中就有了“雷”和“电”字，西周《礼记》中也有关于雷的记载：“是月也，日夜分，雷乃发声……雷而发声，始电。”古代多长矛、剑、戟等锋刃尖利的兵器，在雷雨天常有尖端电晕放电现象发生，因此，《汉书·西域记》中就有“元始中(公元 3 年)……矛端生火”的记载；晋代《搜神记》中也描述了相似的现象：“戟锋皆有火光，遥望如悬烛。”

另外，古人还通过观察，详细记述了雷电的破坏作用，如《南齐书》就记录了一次雷电磁感应造成的破坏现象：“雷震会稽山阴恒山保林寺，刹上四破，电火烧塔下佛面，而窗户不异也”；相似的描述还见诸宋代沈括的《梦溪笔谈》：“内侍李舜举家曾为暴雷所震。其堂之西室，雷火自窗间出，赫然出檐。人以为堂屋已焚，皆出避之。及雷止，其舍宛然。墙壁窗纸皆黔。有一木格，其中杂储诸器，其漆器银者，银悉熔流在地，漆器曾不焦灼。有一宝刀，极坚刚，就刀室中熔为汁，而室亦俨然。人谓火必当先焚草木，然后流金石。今乃金石皆铄，而草木无一毁者，非人情所测也？”

中国古代对雷电本质的认识首先是从唯心主义角度出发的，古人把雷电作为一种神秘自然现象同鬼神联系起来，认为雷击是雷神、电母发怒的结果，而雷击留下的烧灼痕迹则是天

神书写的罪状，俗话说“天打五雷轰”，提醒人们别作坏事以免受上天的惩罚。古人认为，雷公是司雷之神，属阳，故称公，又称雷师、雷神；电母是司掌闪电之神，属阴，故称母，又称金光圣母、闪电娘娘。例如《括物志》记载：“雷泽有雷神，龙首人颊，鼓其腹则雷。”

中国古代哲学家还从朴素唯物主义出发，对雷电本质进行了分析，提出了无神论的观点——以阴阳、五行学说解释雷电现象，其中许多观点与现代科学对雷电的认识不谋而合。例如：东周庄周在《庄子》中提出：“阴阳分争故为电，阳阴交争故为雷，阴阳错行，天地大骇，于是有雷、有霆”；西汉刘安《淮南子·坠形训》记载“阴阳相薄为雷，激扬为电”，认为雷电是阴阳两气对立的产物；唐代柳宗元在《断刑论》中说：“夫雷霆雪霜者特一气耳，非有心于物者也”，认为雷击只不过是一种自然现象，而并非天神有意惩罚人类；陆佃的《物性门类》提出：“其光为电，其声为雷”，认为雷声和闪电是同一事件的两种表现形式；明代理学家朱熹也认为雷电是“阴阳之气，闭结之极，忽然迸散出”；类似观点还见于明代刘基的《刘文正公文集》：“雷何物也？曰雷者，大气之郁而激发也，阴气困于阳，必迫，迫急而迸，迸而声为雷，光为电。”可见，当时人们已经认识到雷电是阴、阳两种不同属性的物质交互作用的结果，这与现代物理学对雷电的解释有共同之处。

在雷电防护方面，基于上述学说，中国古代建筑中也较早使用了建筑防雷技术。由于中国古建筑依据材料大致可划分为金属建筑、砖石建筑和木结构建筑3种，相应的防雷技术也大致包括以下4类。

### 1. 使用绝缘建筑材料

避雷室是文献记录最早出现的一种避雷建筑，距南朝盛弘之《荆州记》记载：“湖阳县，春秋寥国，樊重之邑也。重母畏雷，为母建石室以避之。悉以文石为阶砌，至今犹存。”

古代建筑物台基使用的主料为砖石，灰浆由白灰、糯米、白矾等合成，地下则铺有厚达一尺的焦炭；墙体主料为砖石、灰浆、白灰、麻、油漆、桐油制的油灰等，所有这些材料，无不具有极好的防潮防腐性能，因而不论是基础，还是墙体、屋顶，整个建筑构成了一个绝缘体。图1-1所示天坛祈年殿就是建在汉白玉绝缘基座上的典型例子。



图1-1 天坛祈年殿

### 2. 加装避雷装置

中国古代的避雷装置主要是指雷公柱和龙吻，这是从唯心论出发得到的防雷装置，雷公柱仅是建筑横梁下的一截木柱，起不到接地作用；龙吻(也称螭吻)则是传说中的水精，通常立于檐角，如图1-2所示，取自五行水能克火，并无科学依据。但也有部分古建筑的避雷装置较为特别，据法国旅行家戴马甘兰1688年所著的《中国新事》一书中记载：中国建筑屋脊两头各安装一个龙头，弯曲的金属舌头自龙口吐出，伸向天空，舌头通过一根细铁丝直通地下。这种结构与富兰克林避雷针类似，但尚未发现此类古建筑实物。

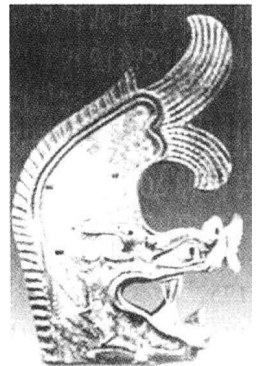


图1-2 龙吻

### 3. 使用金属屋顶

此类古代建筑以道观、寺庙(特别是藏传佛教寺庙)居多,其显著特点是具有镏金铜瓦覆盖的屋顶,如图 1-3 所示。

在武当山主峰有一座 500 多年历史的金殿,是全铜建筑,雷雨时常出现“雷火炼殿”壮观景象。金属屋顶本身就起到了避雷针接闪器的作用,能够大大减小直击雷进入室内的概率。

### 4. 建筑物选址

古建筑大多选址于居高面南、前临溪谷、大海或低地,后有丘陵、大山或高地。由于享受阳光的照射,不断获得清新凉爽的风吹,使建筑物免受潮气侵袭,保持清凉干燥状态。据统计,环山地带 90% 以上的直击雷均击中丘陵、树木等较高物体,因此,三面环山的地域是较为理想的低落雷概率区域。

总之,中国古代对雷电的研究远早于西方,但是由于中国古代重视思辨而轻视科学实验,因此雷电的认识基本停留在对自然现象的观察上,未能进一步通过物理实验研究其内在规律,使科技发展在近代大大落后于欧美。17 世纪,静电学的发展为现代雷电研究打下了基础,人类对雷电的本质有了更加科学的认识。到 18 世纪,初步建立了雷电科学体系。1752 年,本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin)发明了避雷针,标志着近代雷电防护工程的开始。



图 1-3 布达拉宫金顶

## 1.3 近代雷电科学发展历程

人类对雷电的科学认识来源于静电理论的发展,大致可分为 3 个阶段。

第一阶段是对雷电本质的科学认识阶段:欧洲对雷电本质的科学认识,开始于 18 世纪。英国皇家学会会长 Francis Hauksbee 于 1706 年第一次将玻璃棒的摩擦起电火花与天空中的闪电联系起来;1746 年,莱比锡大学教授 Johnn Heinrich Winkle 论证了雷电本质上是一种大电荷量的火花放电;美国著名科学家富兰克林对雷电科学的发展作出了划时代的贡献,他系统研究了带电体尖端放电过程,改进了莱顿瓶实验并获得强烈的火花放电;他还首次用风筝将天电引到实验室中,从而进一步证实了闪电本质上就是一种静电放电,1752 年富兰克林发明了尖头避雷针,成为至今仍广泛使用的建筑物接闪装置。



图 1-4 富兰克林

第二阶段的研究集中于大气电场和电磁学方面:1752 年 Lemonier 发现了大气电场的存在;Lord Kelvin 则进一步将前人对大气电场的定性描述发展到定量测量,1860 年他发明了象限静电计,用以大气电场测量;Kelvin 创造性地提出研究雷电应该从大气电场测量、雨滴

起电机理、照相记录 3 方面进行，而后来的雷电研究则几乎完全是沿着这条路前进的；1864 年 James Clerk Maxwell 发展了电磁场理论，首次提出法拉第笼是最理想的避雷器；Maxwell 与 Kelvin 的杰出贡献奠定了现代雷电及其电磁脉冲防护的理论基础。

第三阶段包括雷电起电、放电机理研究：德国物理学家 Pockels 在 1897—1900 年间利用闪电激发的磁场测量了雷电流；Walter 于 1903 年发明了移动照相法研究闪电，首次发现一次闪电包含几次放电过程；关于闪电机理的研究，最早是从现场观测研究开始的，早在 1925 年，Wilson 首先通过测量雷雨前后的大气电场，估算了雷雨云所带电荷；1926 年，Boys 首先进行了闪电摄像研究；1927 年，Simpson 通过研究液体的静电起电现象，提出雷雨云起电与雨滴的反复破碎及冰晶之间的碰撞有关；1938 年，Schonland 完善了闪电的梯式先导学说。第二次世界大战期间，由于雷暴威胁飞机和气球飞行、干扰无线电通信，美、德军方都投入大量人员进行研究，加上雷达和航空技术的进步，为雷电科学提供了新的测量手段。Schonland(1956 年)和 Berger(1966 年)先后提出闪击由先导放电和主放电两个发展阶段组成。

20 世纪 60 年代以后，雷电对航天器和电子设备的危害逐渐增加，引起了广泛的重视，雷电成为研究热点，伴随航天技术的兴起，人造卫星也用于大气测量。从此，雷电研究进入了一个崭新时期：探空火箭用于雷雨云电量、电场的探测，使人们获得了更准确的实验数据；为克服火箭本身有诱发闪电的弱点，U2 和 ER-2 高空侦察机被用于研究雷雨云内的电特性和光特性，探测仪器包括激光、红外线、可见光和微波扫描器，以及分光仪和电场天线等。飞机在 20km 高空以 200m/s 的速度飞行，能俯视大范围的雷雨云，研究证实了 Wilson 关于雷雨云顶部电场产生向上流动的云内传导电流的理论，并证明对流最激烈的地方也是电场活动最频繁的地方。1990 年 4 月 28 日，宇宙飞船获得了由同温层向上发展的闪电的照片；1993 年 6 月，美国阿拉斯加大学地球物理研究所的科学家根据 DC-8 太空实验室发回的照片，确认了从雷雨云向大气同温层发出的短暂闪电，称为“red sprites”，与通常闪电不同的是，它的放电通道狭窄，而水平覆盖范围达 95km。

20 世纪 60 年代初升空的 OSO(Orbiting Solar Observatory, 轨道太阳实验室)卫星上的紫外光谱仪，意外观测到了地球上的闪电。从此，科学家们研制了用于闪电探测的专用星载光学传感器，典型的闪电光学探测器如下：

(1) 光度计(Photometer)。OSO 系列卫星上携带的光度计可以探测闪电。它们是宽波段光度计( $0.35\mu\text{m} \sim 0.5\mu\text{m}$  或  $0.6\mu\text{m} \sim 0.8\mu\text{m}$ )，最小光探测阈值是  $3 \times 10^5$  光子/ $\text{cm}^2$ ，对应闪光功率约为 108W。其望远镜视场为  $10^\circ$ ，空间分辨率  $1^\circ$ 。

(2) 扫描辐射计(Scanning Radiometer)。搭载于早期的美国国防气象卫星 DMSP 上，轨道高度 830km，地面分辨率为 100km，探测灵敏度在闪电功率范围，只能观测午夜时的闪电活动。

(3) 硅光电管探测器(又称当量计)。搭载于 Vela 系列预警卫星上，卫星轨道高度  $1.1 \times 10^5$ km，因此几乎覆盖了半个地球。当量计主要监测大气层中的核爆炸事件，仅被快速变化的闪光信号所触发并记录。其触发阈值定在  $10^{11} \sim 10^{14}$ ，比一般的闪电光功率高 2 个数量级。因此，只能观测到一些超级闪电(Superbolts)。仪器的地面视场约为  $10^\circ \times 10^\circ$ ，测量光谱范围  $0.4\mu\text{m} \sim 1.1\mu\text{m}$ 。

(4) 硅光电管阵列探测器(Photodiode Array)。搭载于 DMSP 系列卫星上，是第一种专

用于闪电探测的仪器，其探测灵敏度比 Vela 卫星上的同类仪器高得多，探测闪光功率范围  $10^8 \text{ W} \sim 10^{10} \text{ W}$ ，可观测当地午夜的闪电。该仪器总重仅 1kg，功耗 0.5W。

(5) 全天候闪电光学监测器(Night/Day Optical Survey of Lightning)。这是一种搭载在航天飞机上的全天候闪电光学监测仪器。其主要组件是一台带衍射光栅的 16mm 摄影机、示警装置、光敏元件和磁带记录仪。白天时由宇航员对闪电摄像，晚上使用衍射光栅获取闪电的光谱信息，从而反演闪电通道的温度、压力、组分、电子浓度、离子百分比等信息。

(6) 闪电定位传感器(Lightning Mapping Sensor, LMS)。由地球静止轨道气象卫星 GOES 搭载，对某一地区进行连续观测。LMS 的视场是  $10.5^\circ$ ，主要由两个  $600 \times 400$  像素的电荷耦合器件 (CCD) 阵组成。地面分辨率为 10km。LMS 采用了空间、光谱和时间滤波以及背景消除技术，有效地去除缓变的强背景光(如太阳反射光)，因此夜晚和白天都能观测。

(7) 光学瞬态探测器(Optical Transient Detector, OTD)。OTD 由微实验室卫星携带，于 1995 年 4 月发射升空，2000 年 3 月圆满完成任务。该探测器的主要任务是通过探测地球表面大面积区域的总闪电活动，提高人类对雷暴分布、云的移动以及暴风雨变化的认识。Microlab-1 卫星轨道高度为 740km，轨道倾角为  $70^\circ$ ，轨道的周期为 100min，完成一个完整的本地日循环需要大约 55 天的时间。OTD 带有  $128 \times 128$  CCD 阵列，采样率大于 500 帧/s。由于广角镜头的使用，OTD 在任一时刻可以看到地球上  $1300 \text{ km} \times 1300 \text{ km}$  区域内发生的闪电，空间分辨率为 10km，时间分辨率是 2ms。

(8) 闪电成像探测器(Lightning Imaging Sensor, LIS)。1997 年 11 月发射的“热带降水测量卫星”主要任务是观测热带、亚热带地区的降水结构、降水率及分布情况，是由日本等国家参与的国际性的雷电研究计划，它搭载 LIS、可见光与红外扫描仪、多通道微波辐射计等先进设备，其中的雷电成像探测器采用了  $128 \times 128$  像素的 CCD 阵列，采样率 500 帧/s，具备广角镜头，能在 350km 高空观测地球上  $600 \text{ km} \times 600 \text{ km}$  区域内的雷电活动，提供清晰的闪电图像和三维定位信息。夜间的闪电探测效率  $93\% \pm 4\%$ ，白天  $73\% \pm 11\%$ 。LIS 以大于  $7 \text{ km/s}$  的速度围绕地球运转，完成一个完整的本地日循环需要约 49 天的时间。

目前，全世界有许多雷电研究组织，每天将各地的闪电数据采集并传送到数据中心，供研究者利用。例如，美国联邦资助的国家雷电探测网(National Lightning Detection Network, NLDN)，由 Arizona 州的全球大气有限公司发起，网络遍布美国，使用设备包括探测距离达 400km 的磁场传感器、雷电定位与跟踪系统、VHF 干涉仪等。目前，该网络已覆盖到大洋州、亚洲、欧洲的部分地区。

物体遭受雷击是个小概率事件，且有一定规律可循，即存在落雷点和易击部位，这是防雷工程的出发点。1990 年，国际电工委员会 (IEC) 颁布了建筑物防雷标准 IEC 1024-1，正式定义了雷电流标准波形和参数，作为防雷研究的依据，规定用峰值电流  $I$ 、电流上升率  $di/dt$ 、波头(或波前)时间  $T_1$ 、半峰值时间  $T_2$  描述雷电流。我国第一部《建筑物防雷设计规范》GBJ 57—83 于 1983 年 11 月公布，第二部《建筑物防雷设计规范》GB 50057—94 于 1994 年 4 月正式颁布，该规范吸收了许多国外先进技术，将接闪器保护范围的计算方法改为 IEC 推荐的“滚球法”并结合我国防雷设计的实际经验增加了许多新条款。

从富兰克林发明避雷针至今，人们一直在探索新的防雷技术。对雷电的防护起初是以建筑物和人作为保护对象的，一套完整的建筑物避雷装置应包括接闪器(如避雷针、避雷带、或避雷网)、引下线、断接卡和接地体，其基本原理是通过接闪器诱发大气电场畸变，把雷

电先导引向自己并将强大的瞬态雷电流导入大地，从而避免建筑物受雷直击。20 世纪以后，随着电力、通信技术的进步，直击雷与感应雷对输电线和电话线路造成的危害日益严重，电力、通信设备成为防雷的重点。W. Peterson 于 1914 年提出了接地避雷线防雷的理论，以后又演化成建筑物使用的避雷带；1922 年，美国西屋公司制成自动阀式避雷器；1968 年日本松下电器公司研制出“无间隙避雷器”，成为避雷器的主流，这些过电压保护器件的出现和应用大大减少了雷击对电力系统的破坏作用。从 20 世纪 50 年代开始，随着航天技术的发展以及半导体、集成电路取代电子管，微电子技术迅猛发展，超大规模集成电路诞生，使微处理器的成本大大降低，应用领域极大地拓宽，微电子技术渗透到诸如现代通信、计算机技术、自动化生产、居民生活等领域之中。由于芯片的能耗甚小，灵敏度极高，使其对各种强电磁脉冲打击变得很脆弱。以往的避雷手段可以使建筑物免受直击雷袭击，却无法躲避与之相伴的雷电电磁脉冲干扰，雷电电磁脉冲的危害范围越来越大。特别是近几十年，超大规模集成电路与计算机技术的迅速发展，促使人们将雷电防护的重点由强电流注入损伤转移到雷电电磁脉冲对微电子线路的损害上，寻找新的综合防雷技术。20 世纪 90 年代以前，国际和国内的标准、规范都缺少关于雷电电磁脉冲防护的规定，1992 年，国际电工委员会防雷专委会(IEC - TC/81)开始讨论这个问题，1995 年 2 月，该机构发布了国际标准《雷电电磁脉冲的防护》IEC 1312 - 1、2、3，分别对雷电电磁脉冲的定义、分区防护和过电压保护器件测试做出了规定。

富兰克林避雷针的主要缺陷是它在引雷的同时会产生强烈的电磁辐射，在周围导体上感应出瞬时高电压或大电流，烧毁电子器件或点燃危险品。20 世纪 90 年代以后的防雷工程主要致力于改进避雷装置以减小雷电流峰值和上升率，减弱电磁辐射。这些改进主要有：采用半导体接闪器，以增大对地电阻；用半导体消雷阵列消灭上行雷，如美国、意大利和我国先后都有公司生产该类设备；采用优化避雷针抑制雷电流上升速率；使用有源避雷针，屏蔽地面上行先导等，但经过实践证明上述改进并不理想，都存在通流能力低、抗风能力差、成本高和引雷的致命弱点。因此有些学者又从雷电预测、消除和躲避角度进行了尝试：美国国家航空航天局在 20 世纪 80 年代中期就将雷电预警系统用于航天器发射；中国科学院空间中心研制了空间电场测试仪和雷电预警系统，于 1991 年 12 月成功投入运行。

另外，主动避雷技术也有所发展：1997 年 1 月日本科学家用 CO<sub>2</sub> 激光引发雷电，获得初步成功，以飞秒激光等为代表的高功率激光技术的发展，给激光消雷技术带来光明的应用前景；用带有接地导线的火箭引发雷电，是比较成功的主动防雷技术；美国海军曾试验用水下爆炸激起的水柱引发雷雨云放电，以避免对军舰的威胁；中国科学院庄洪春研究员提出用等离子体屏蔽法保护建筑物免遭雷击，引起了同行关注。

国内外学者对雷电回击过程进行理论研究的同时，也开展了闪电参数测量实验。研究自然闪电由于受到地域和季节的限制，有许多实验是利用火箭进行人工引雷实验。1998 年—2000 年期间，受国家电力公司的委托，由广东电力试验研究所牵头与原中国科学院兰州高原大气物理研究所及武汉水利电力大学合作在广东从化(1998—1999)及韶关地区(1999—2000)进行了火箭引雷试验，对闪电通道底部电流进行测量，并研究半导体消雷器的防雷效果。实验采用火箭拖带的细钢丝直接接地和通过 100m 左右的绝缘尼龙线再经电流测量装置和大地连接两种方式。前者是传统引雷方式，可以模拟高建筑物激发的上行雷；后者称为空中引雷方式，可以模拟下行雷与地面目标物的连接，实验共取得 5 次成功，其中有 3 次空中



引雷被高速摄像机记录到, 1999 年实验地点与 1998 年相同, 重点是研究半导体消雷器的防雷效果, 共有效发射 20 发火箭, 都是采用细钢丝经 6m 的尼龙线和消雷器相连接的方式以保证人工引雷能击中消雷器, 实验记录到有意义的的数据或图像 11 次, 其中 8 次成功地将雷电引到消雷器上, 5 次形成放电主通道(一次引起消雷针的表面爆裂损坏), 取得了雷电流、电网地电位升高、快慢电场变化高速摄像等一批综合观测资料。

总之, 雷电防护技术已由单纯重视直击雷和强电防护转向直击雷和雷电磁脉冲并重、强电防护与弱电防护并举; 在防护方法上, 从分流、等电位连接、接地针对传导过电压的防护方法, 发展到包括针对电磁场防护的屏蔽、滤波等技术的综合雷电防护技术。

## 1.4 我国雷电发生频率分布

雷电发生频率, 对雷电及电磁脉冲的防护是至关重要的参考数据, 评价某一地区雷电活动的强弱, 通常用两种方法: 雷暴日和落雷密度。

国际气象学联合会(World Meteorological Association, WMA)规定用“雷暴日”来描述某一地区雷电发生的密度, 即以一年当中该地区有多少天发生人耳能听到雷鸣来表示该地区的雷电活动强弱, 雷暴日的天数越多, 表示该地区雷电活动越强; 反之则越弱。

因为人耳能听到的雷声, 一般距离在 15km 左右, 更远的雷声就听不到了, 所以雷暴日只能反映局部地区雷电活动情况。

一些科学家认为用雷暴日表征局部地区雷电活动不够准确, 因为一天当中听到一次雷声就算一个雷暴日, 而一次当中听到 1000 次雷声也算一个雷暴日, 因此, 应以  $1\text{km}^2$  范围内发生的闪击次数来表征某一地域的雷电发生数量, 这样就得出一种新的评价雷电活动的方法, 称为落雷密度。因此, 落雷密度是  $1\text{km}^2$  范围内一年总共发生的雷击次数。显然, 它只能借助于电子设备进行测量, 不能像雷暴日那样用人耳观测。对航空、航海、气象、通信等覆盖区域较广的行业而言, 用落雷密度来评价一个地区的雷电活动情况更为准确。大量观测统计数据表明, 一个地区的落雷密度与雷暴日是相关的, 满足如下公式:

$$N_g = 0.024T_d^{1.3}$$

式中  $N_g$ ——落雷密度(次/  $(\text{km}^2 \cdot \text{年})$ );

$T_d$ ——雷暴日(天/年)。

关于地区雷暴日等级划分, 不少行业根据具体情况, 制定本行业标准, 如 DL/T 620—1997、YD/T 5098 等, 这些标准对地区雷暴日等级的划分方法都不尽相同。GB 50343—2004《建筑物电子信息系统防雷技术规范》规定, 根据地区雷暴日多少可划分为 4 个落雷等级:

- (1) 少雷区。指年平均雷暴日不大于 20 天的地区。
- (2) 多雷区。指年平均雷暴日大于 20 天、但不超过 40 天的地区。
- (3) 高雷区。指年平均雷暴日大于 40 天、但不超过 60 天的地区。
- (4) 强雷区。指年平均雷暴日超过 60 天的地区。

我国地域广阔、地形复杂, 气候区跨越亚热带和温带, 南、北气候差异明显。防雷工作者通过长期的观测、统计, 将我国雷暴分布情况划分为 4 个区域: 第一区域为北纬  $37^\circ$  以南、东经  $107^\circ$  以东地区; 第二区域为北纬  $37^\circ$  以南、东经  $107^\circ$  以西地区; 第三区域为北纬